식품산업에서의 광펄스 살균기술

Intense Pulsed Light Sterilization in Food Industry

정명수

Chung, Myong Soo

이화여자대학교 공과대학 식품공학전공

Department of Food Science and Engineering, Ewha Womans University

1. 서론

오늘날 소비자들의 건강에 대한 높은 관심으로 천연 상태의 품질을 가능한 유지한 최소 가공 식품(minimal processed foods)에 대한 수요가 크게 증가하고 있으며, 최소 가공법이란 식품 본래의 신선한 품질을 그대로 유지하면서 식품의 안전한 보존 수명을 부여할 수 있는 가공방법을 말한다.

식품의 보존성을 향상시키기 위하여 전통적으로는 가열, 건조, 냉동 등의 물리적 방법이나 식품 보존제의 첨가와 같은 화학적 방법을 사용하여 왔으나 가열 가공식품은 열에 의해 영양성분을 파괴시키고 조직감 및 색의 변화 그리고 향미성분의 손실 등 식품의 품질저하를 일으키게 되고, 냉동 또는 건조 가공식품은 장기간 저장할 경우 품질 및 소비자 기호도가 감소하게 되며, 인공 보존료는 점차 사용하지 않는 경향이 있다.

따라서 식품 가공 및 포장 기술에서 새로운 기술의 도입이 지속적으로 요구되고 있어 여러 가지 非熱 가공(nonthermal process) 기술이 개발되고 있으며 이들 비열 가공 기술은 종래의 열적(thermal), 화학적(chemical) 방법과는 달리 전기적(electrical) 및 물리적(physical) 조작으로서 이들 기술의 실용화에 의해 소비자들에게 품질적인 측면에서 보다 우수하고, 천연의 영양 성분을 그대로 함유하고 있으며, 신선하고 食味가 우수한 고품질의 안전한 식품을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 현재 식품산업에서 실용화를 위해 연구되고 있는 비열처리 가공기술 중 대표적인 물리적 방법으로는 초고압(high hydrostatic pressure), 고전압 펄스 전기장(high voltage pulsed electric field), 진동 자기장(oscillating magnetic fields), 조사법(ionizing radiation), 광펄스(Intense pulsed light), 광촉매 산화반응(photocatalytic oxidation) 등이 있다. 이러한 기술들은 각각 대상 식품에 따라 그 적용 분야가 다르며 동시에 모든 식품 분야에 적용할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

*Correspondence to: Chung, Myong Soo, Department of Food Science and Engineering, Ewha Womans University 11-1 Daehyun-dong, Seodaemun-gu Seoul 120-750, Korea
Tel : +82-2-3277-4508 E-mail : mschung@ewha.ac.kr

2. 비열가공기술 개발의 필요성

앞서 언급한 바와 같이 비가열 신선식품의 소비량이 점차 증가하고 있는 현시점에 이러한 식품으로 인한 식중독의 위험은 따라서 증가할 수 밖에 없고 소비자들에게 미치는 영향 또한 지대한 것으로 여겨진다. 그러나 비가열 식품이라는 특성을 지닌 수산식품이나 채소, 과일, 생식 등 여러 신선식품은 최소한의 가열공정만을 거치게 되므로 식품원료 내에 존재하는 미생물 또한 그대로 유지될 수 밖에 없는 문제점을 내포하고 있다.

어느 연구결과에서는 일부 시판생식에서 식중독균인 *Bacillus cereus*가 검출되었고 포자 형성균과 대장균군도 검출되어 생식제품들의 미생물학적 안전성에 대한 문제가 제기된 바 있으며, 특히 수산식품 및 축산식품으로 인한 미생물의 오염으로 인해 구토, 설사, 복통 등의 질병이 발생되어 사망 또는 피해를 입는 사례가 보고되고 있다. 또한 2008년 4월에는 훈제 연어 7개 제품에서 식중독의 원인균인 *Listeria monocytogenes*가 검출되어 생산된 3,161 kg 중 1980 kg이 회수 및 압류되었으며, 관련 제품에 대한 긴급 회수 초치가 이루어진 예가 있다. [표 1]은 식약청 자료에서 발췌한 여러 신선식품에서 병원성 박테리아의 검출현황을 나타내고 있다.

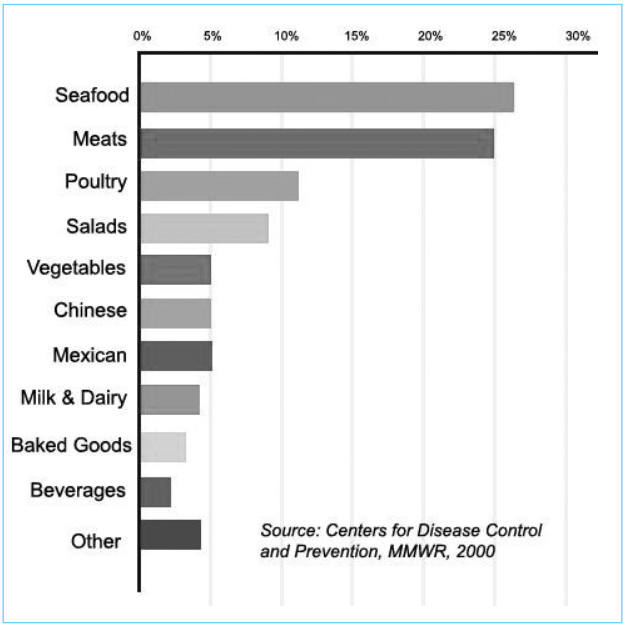

그림 1. 식중독의 원인이 되는 주요 식품들

미국에서 보고된 자료에 의하면 식품 내의 세균감염으로 인한 질병 발생건수가 매년 7백만 건으로 7,000여명이 사망에 이르고 있으며, 이중에서 어류 및 육류로 인한 발병이 전체 발생건수의 절반 이상을 차지하고 사망자가 4,000여명으로 어류 및 육류의 안전문제가 큰 문제로 등장하고 있다. [그

<표 1> Distribution of food-borne pathogenic bacteria at various foods

Region	Total	Vegetable salads	Kimbab/Hambergers/Sandwiches	Sliced raw fish
Total sample	250	67	48	40
Detected sample number	23(9.2%)	6(9.0%)	5(10.4%)	3(7.5%)
E. coli	4(1.6%)	2(3.0%)	1(2.1%)	-
S. aureus	9(3.6%)	2(3.0%)	4(8.3%)	3(7.5%)
B. cereus	10(4.0%)	2(3.0%)	-	-
V. parahaemolyticus	-	-	-	-
Salmonella spp.	-	-	-	-
L. monocytogenes	-	-	-	-
E. coli O157:H7	-	-	-	-
C. jejuni	-	-	-	-
Cl. perfrigens	-	-	-	-
Y. enterocolitica	-	-	-	-

* The Annual Report of KFDA, Vol. 9, 2005

<표 2> *Enterobacter sakazakii* and other Enterobacteriaceae isolated from powdered infant formulas

Organisms	The number of PIFs (%)
Acinetobacter baumannii/calco	1/51 (2%)
Cedecea davisae	1/51 (2%)
Citrobacter freundii	2/51 (4%)
Cryseomonas luteola	2/51 (4%)
Enterobacter amnigenus	1/51 (2%)
Enterobacter cloacae	12/51 (24%)
Escherichia hermannii	1/51 (2%)
Escherichia vulneris	1/51 (2%)
Flavimonas oryzihabitans	1/51 (2%)
Klebsiella oxytoca	1/51 (2%)
Micrococcus spp.	1/51 (2%)
Pantoea spp.	1/51 (2%)
Pasteurella pneumotropica/haemolytica	1/51 (2%)
Shigella spp.	1/51 (2%)

※ 국내 조제분유에 존재하는 *Enterobacter sakazakii*의 스크리닝 및 특성 분석(이화여자대학교 대학원 2005학년도 석사학위 청구논문)

림 1]에서는 미국의 식중독 발생 현황을 원인 식품별로 나타낸 2000년도 통계자료로서 식중독의 주요 원인이 되는 식품이 어·육류, 가금류, 채소 등 각종 신선식품이 주를 이루고 있음을 보여주고 있다.

[표 2]에서 보는 바와 같이 영·유아 식품인 분유에서 검출되어 논란이 되어온 엔테로박터 사카자키(*E. sakazakii*)균의 규격이"불검출"로 바뀜에 따라 이러한 영·유아식품과 신선식품 등 비가열 식품 속의 위해 세균을 제거하고 식중독 발병률을 감소시키는 일은 더욱 더 중요한 사항이 되었으며, 이를 위해 관련 업계에서는 비열처리 살균방법에 대한 연구와 기술의 실용화가 없어서는 안 될 매우 중요한 사안으로 대두되고 있다.

3. 광펄스(Intense pulsed light) 기술이란?

비엘 가공기술 중의 하나인 광펄스 기술은 "intense light pulse", "pulsed white light(WHL)", "broad-spectrum white light" 등 여러 가지 이름으로 불리며 광펄스에서 사용되는 빛의 영역은 170-2600 nm의 범위로서 자외선(UV) 영역뿐만 아니라 근적외선(NIR) 영역까지 포함한다는 점에서 기존의 UV 살균과는 구별된다.

광펄스 살균 장치의 원리는 기본적으로 펄스 전기장 살균 장치와 그 원리가 같으며 펄스 전기장의 살균 장치는 [그림 2]에 나타내었다. 광펄스 살균 장치는 고전압 펄스 전기장의 살균 장치의 pulser pipe와 electrode 대신에 broad spectrum을 갖는 lamp를 연결하게 되며 switch의 역할을 하는 contactor가 L의 위치에 놓이면 고전압 직류 발생기 3에 의해 높은 전압이 capacitor인 5에 축적이 되고, 충전이 완료된 후 contactor가 E에 놓이게 되면 capacitor에 축적되어 있는 전기 에너지가 2 위치에 연결된 lamp를 통해 방전되면서 강한 빛을 발생시키게 되고 이렇게 발생된 빛을 식품에 조사함으로서 살균이 이루어지게 된다.

광펄스 처리 시 0.01-50 J/cm^2 범위의 에너지밀도(energy density)를 가지는 pulse가 1 ㎲ - 0.1 s의 간격으로 1-20회의 flash 형태로 물질에 가해지며, 광원으로는 일반적으로 450 torr 정도의 압력으로 xenon이 채워진 clear fused quartz tube가 사용된다. 이 기술의 근본적인 원리는 전 파장의 강한 빛을 아주 짧은 시간 안에 식품에 가하여 식품의 표면을 살균시키거나 표면 미생물 수를 감소

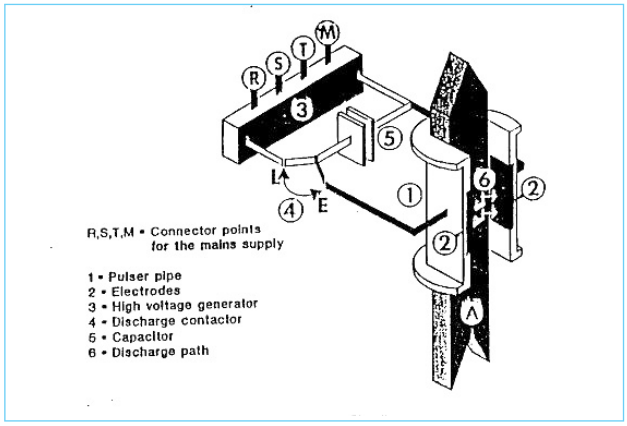

그림 2. 고전압 발생장치

시키는데 있으며, 제품의 유통기한을 연장하고 품질을 높이기 위한 목적으로 사용되며 식품표면의 살균뿐만 아니라 포장재나 투명한 약품의 살균에도 사용될 수 있다.

광펄스 기술의 살균력은 빛의 파장, 빛의 강도, pulse의 수와 주기(조사시간), 시료와 광원 사이의 거리와 포장재와 식품의 종류, 액체시료의 경우 투명도, 색 등에 의해서 결정되며 제품의 종류와 살균하려는 면적에 따라 lamp의 수와 배치, pulse 주기가 달라진다.

광펄스 기술에 의한 미생물 사멸 기구는 아직 구체적인 이론이 정립되지 않았으나 기존의 UV 살균의 경우와 마찬가지로 빛을 쪼여 세포의 DNA 구조를 파괴함으로써 미생물이 사멸되는 것으로 보고 있다. 다만 UV 살균의 경우 손상된 DNA가 특정 환경에서 cell repair system에 의해 미생물이 정상 상태로 회복될 수 있는 확률이 매우 큰 반면, 광펄스 살균은 앞서 UV 살균보다 큰 손상을 주어 미생물이 회복될 수 있는 확률을 낮추어 주기 때문에 UV 살균법에 비해 효과적으로 미생물을 제어할 수 있는 것으로 알려져 있다.

4. 관련기술 동향

미국의 PurePulse Technologies사는 광펄스 장치인 PureBright를 개발하여 이를 의약품, 의료기기, 포장재, 생수 등의 살균에 적용하고 있으며, 이 회사에서 개발된 장치에 의해 발생되는 펄스의 세기는 지구표면에 작용하는 태양

그림 3. 의료기 살균에 적용된 광펄스 살균 장치

광선에 비해 20,000배 정도가 되는 것으로 보고되고 있다. 또한 이 장치를 이용하여 다양한 종류의 세균(숙주세포 및 포자), 곰팡이, 바이러스 등 각종 미생물에 대한 살균효과를 광범위하게 고찰하고 있는 것으로 알려지고 있다. 이 장치는 여러 종류의 식품 및 포장재 살균에 적용하였는데, 일반적으로 토마토는 냉장보관을 해도 금방 물러지기 쉽지만 Pure Bright 장치를 적용한 후 냉장보관을 하였을 때 토마토가 30일 정도 신선하게 보관이 되었으며, 식빵의 포장지를 광펄스 살균을 한 후 사용하였을 경우에는 식빵이 2주 이상 신선한 상태를 유지하였으나 광펄스 살균을 하지 않은 포장지에 넣은 식빵의 경우엔 같은 기간에 곰팡이가 많이 발생했다는 연구 결과를 발표하였다. [그림 3]과 같이 최근에는 이 장치를 의료기의 살균에도 적용하고 있는 것으로 알려지고 있다.

Dunn 등은 다양한 빵류의 제품에 광펄스 살균을 적용하여 곰팡이를 효과적으로 살균함으로써 유통기한을 연장할 수 있다는 연구결과를 보고하였고, 새우를 광펄스 처리를 한 후 7일간 냉장 저장하였을 때는 양호한 상태를 유지하였으나 광펄스 처리를 하지 않고 냉장 저장하였을 때는 변색, 이취 등이 발생하여 식용할 수 없는 상태가 된 것으로 보고하였다. Dunn 등은 또한 계육, 핫도그, 치즈 등 여러 종류의 식품에 존재하는 *Escherichia coli, Staphylococcus aureus, Bacillus subtilis, Saccharomyces cerevisiae, Listeria innocua, Salmonella, Pseudomonas* 등의 살균에 광펄스 기술을 적용하여 관능적 변화를 최소화하면서 효과적으로 유통기한을 연장할 수 있다는 연구결과를 발표하였다.

미국 FDA에서는 광펄스 살균 기술의 사용 권고 기준을 마련해 놓았는데 (Food and Drug Administration Issues Approval for Pulsed UV Light in the

<표 3> 식품 살균에 사용하기에 적합한 광의 특성

	이론상 기준	FDA 권고 기준
wavelength	170-2600 ㎚	200-1000 ㎚
가해지는 에너지 밀도	0.01-50 J/㎠	12 J/㎠ 이하
pulse range	1 ㎲ - 0.1 s	2 ㎳ 이하

* FDA의 권고 기준에는 기대하는 효과를 얻기 위해서 최소한의 pulsed light만을 사용해야 한다는 점도 명시되어 있음.

Production, Processing and Handling of Food [Code 21CFR179.41]) 여러 문헌에서의 광펄스 살균 기술의 기준과 미국 FDA의 권고 기준의 차이는 [표 3]과 같다.

2000년 이후부터 광펄스의 미생물 사멸작용에 대한 mechanism을 규명하기 위하여 여러 연구팀들이 이에 대한 연구를 시작하였다. 초기에는 광펄스에 의한 미생물 사멸작용이 UV 파장에 속하는 광펄스에 의해 UV에 의한 살균효과와 동일한 것으로 판단하였으나 차후 다양한 실험에 의해 광펄스에 의한 사멸작용이 photothermal mechanism과 photochemical mechanism이 동시에 작용하여 나타난다고 보고되었다. 그러나 광펄스에 의해 시료의 온도가 상승하지 않는 것으로 볼 때 photothermal mechanism에 대한 이견이 대두되어 현재까지도 정확한 사멸기작을 해명하지 못하고 있는 실정이다. 광펄스 적용시 DNA 상에서의 thymine dimer 생성, DNA single strand break에 의해 미생물이 사멸되는 것으로 현재 이론이 정립되고 있으며 미생물 세포막의 파괴에 의해 세포 내용물이 유출되면서 미생물이 사멸되는 data도 보고되고 있다. 최근에는 photosensitizer를 사용하여 광펄스를 적용시켰을 때 미생물의 사멸율이 상승한다는 보고가 있어 photosensitization에 관한 연구가 대두되고 있다.

지금까지의 선행 연구 결과를 종합해 볼 때, 광펄스 기술은 분유나 생식 등의 분말식품에 대한 살균효과가 있으며, 에너지의 효율성이 높은 것으로 보이며, 수산식품이나 육류식품 등 신선식품의 표면살균에 있어 안전성 측면에서 적용가능성이 매우 높은 기술로 보인다. 국내에서는 아직까지 그 연구의 범위와 활용도가 매우 미약한 수준에 머무르고 있으며 광펄스에 의한 미생물 사멸기작에 대한 연구가 전혀 시도되고 있지 않아 앞으로 이 기술의 실용화를 앞당기기 위해서는 보다 폭넓고 깊은 연구가 선행되어져야 할 것으로 사료된다.

5. 결론

앞서 살펴본 바와 같이 광펄스 기술은 식품의 이화학적, 관능적 변화를 최소화하면서 식품 표면이나 포장재에 존재하는 각종 위해 미생물을 효과적으로 살균함으로써 상업적 식품의 유통기한을 연장할 수 있는 비열 살균법이다. 미국, 독일 등의 선진국에서는 일부 회사가 의료용이나 한정적인 식품용 살균 장치로서 상용화에 나서고 있으나 아직 본격적인 상업화가 이루어지지 않고 있으며, 또한 이에 대한 연구결과도 많이 축적되어 있지 않아 과학적 근거가 부족한 실정으로 광펄스 기술의 적용 범위를 더욱 확대하고 본격적인 상업화를 위해서는 보다 깊은 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다. 즉 광펄스의 성질(파장, 세기, 펄스의 길이 및 수 등), 포장재, 적용식품의 특성(식품의 화학적 특성, 투명도, 색상 등), 액체식품의 경우 대상물의 깊이 등과 같은 주요공정요소(critical process factors)들이 미생물의 불활성화에 어떻게 영향을 미치는지에 대한 연구가 필요하며, 표면이 울퉁불퉁하고 불투명한 고체식품에 대해서는 살균효과가 다소 낮은 것으로 알려져 있는데 이에 적합한 광의 종류나 세기에 대한 보다 깊은 연구가 선행되어야 한다. 또한 전통적으로 사용되고 있는 254 nm 부근의 파장을 가진 자외선(UV) 살균과의 미생물 불활성화 측면에서의 차이점이 좀 더 명확히 밝혀져야 하고, 나아가 광펄스에 의한 미생물 불활성화 기작(mechanisms of microbial inactivation)에 대한 보다

심도 깊은 연구가 이루어져야 할 것이다.

광펄스 기술의 산업화를 위한 또 한 가지 중요한 측면은 보다 경제적이고 실용적인 하드웨어의 개발인데, 광펄스 살균 시스템의 개발을 위해서는 고전압을 발생시키는 전원 발생기와 이를 짧은 시간 안에 방전시킬 수 있는 스위치, 적당한 파형을 만들 수 있는 pulse generator, pulse forming network(PFN), broad spectrum의 빛을 발생시킬 수 있는 긴 수명을 가진 lamp, 살균하고자 하는 시료가 광에너지를 효과적으로 받을 수 있도록 설계된 sample treatment chamber 등의 개발이 매우 중요하며 이를 위해서는 전기 및 기계 관련 학문 및 산업체와의 연계가 필수적이다.

[감사의 글]

본 연구는 2011년도 식품의약품안전청 용역연구개발과제의 연구개발비 지원(10162기후식995)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

(1) Dunn J, Ott T and Clark W. 1995. Pulsed-Light Treatment of Food and packaging. Food Technol. 49(9): 95-98.
(2) Cho HY, Shin JK, Song YE, Yoon SJ, Kim JM and Pyun YR. 2002. Nonthermal pasteurization of lactic acid bacteria by high intensity light pulse. Korean J. Food Sci. Technol. 34(4): 631-636.
(3) Anderson JG, Rowan, NJ, MacGregor SJ, Fouracre RA and Farish O. 2000. Inactivation of food-born Enteropathogenic bacteria and Spoilage fungi using pulsed-light. IEEE Transactions on Plasma Sci. 28: 83-88.
(4) Gomez-Lopez VM, Devlieghere F, Bonduelle V and Debevere J. 2005. Intense light pulses decontamination of minimally processed begetables and their shelf-life. International J. Food Microbiol. 103: 79-89.
(5) Rowan NJ, Macgregor SJ, Anderson JG, Fouracre RA, Mclivaney LM and Farish O. 1999. Pulsed-light inactivation of food-related microorganisms. Applied Environ. Micobiol. 65(3): 1312-1315.
(6) Huffman DE, Slifko TR, Salisbury K and Rose JB. 2000. Inactivation of Bacteria, Virus and Cryptosporidium by a point-of-use device using pulsed broad spectrum white light. Wat. Res. 34(9): 2491-2498.
(7) Marquenie D, Michiels CW, Van Impe JF, Schrevens E and Nicolai BN. 2003. Pulsed white light in combination with UV-C and heat to reduce storage rot of strawberry. Postharvest Biol. Technol. 28: 455-461.
(8) Marquenie D, Geeraerd AH, Lammertyn J, Soontjens C, Van Impe JF, Michiels CW and Nicolai BM. 2003. Combinations of pulsed white light and UV-C or mild heat treatment to inactivate conidia of Botritis cinerea and Monilia Fructigena. International J. Food Microbiol. 85: 185-196.
(9) Turtoi M and Nicolau A. 2007. Intense light pulse treatment as alternative method for mould spores destruction on paper-polyethylene packaging material. J. Food Eng. 83: 47-53.
(10) Cho HY, Shin JK, Song YA, Yoon SJ, Kim JM and Pyun YR. 2002. Nonthermal Pasteurization of Lactic acid bacteria by high intensity light pulse. Korean J. Food Sci. Technol. 34(4): 631-636
(11) Choi MS. 2008. Nonthermal sterilization of Enterobacter sakazakii and Listeria monocytogenes in infant foods using intense pulsed light, M.S. Thesis, Ewha Womans Univ.
(12) Gomez-lopez VM, Devlieghere F, Bonduelle V and Debevere J. 2005. Factors affecting the inactivation of micro-organisms by intense light pulsed. J. Applied Micobiol. 99: 460-470.
(13) Gomez-Lopez VM, Ragaert P, Debevere J and Devlieghere F. 2007. Pulsed light for food decontamination: a review. Trends in Food Sci. Technol. xx (2007) 1-10.
(14) Dunn J, Clark RW, Asmus J, Pearlman J, Boyer K, Painchaud F and Hoffmann G. 1991. Methods for preservation of food stuffs. US Patent 5,034,235.
(15) Barvosa-Canovas GV, Palou, E, Pothakamury UR and Swanson BG. 1997. Application of light pulses in the sterilization of foods and packaging materials. In: Nontermal Preservation of Foods. Chapter 6. pp. 139-161. Marcel Dekker. New York. US.